中国生态农业学报 2017 年 5 月 第 25 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2017, 25(5): 749−758



**DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160758**

李佳旸, 王延平, 韩明玉, 张林森, 韩稳社. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 749−758
Li J Y, Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, Han W S. Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 749−758

# 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究*

李佳旸[1,2], 王延平[1,2**], 韩明玉[3], 张林森[3], 韩稳社[1,2]

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学园艺学院 杨凌 712100)

**摘 要:** 掌握土壤水分特征是实现果园科学管理、有限雨水资源合理高效利用、保证果树高产优质的关键。以陕北米脂山地 6 年生红富士苹果园为研究对象, 于 2015 年 4 月—2016 年 6 月采用 FDR、中子水分仪和烘干法相结合的土壤水分监测方法, 分析了山地苹果园的土壤水分总体特征、单株不同位点的水分动态以及不同旱作措施(秸秆覆盖、起垄覆膜垄沟集雨、有机肥覆盖)的土壤水分环境效应。结果表明: 陕北山地果园时段干旱严重, 最严重的为苹果树新梢生长和幼果发育期; 春季土壤干旱程度取决于上年入冬前土壤储水量高低。果园 0~60 cm 土层(根系分布集中层)水分随降雨量而变化, 表现为较一致的季节变化特征; 土壤水分的变化滞后于降雨变化, 且降雨对土壤水分的影响随土层加深而减弱, 100 cm 深土层受降雨影响减弱, 土壤剖面 200 cm 以下土层土壤含水量保持相对稳定。6 年生山地苹果园土壤已经出现干化现象, 且在 90~300 cm 存在明显的低湿层, 土壤体积含水量常年处在 12%以下。苹果树单株尺度范围内, 土壤含水量随距树干距离增加单调递增; 土壤水分的平均值处在距树干 105 cm 处; 沿行向距树干不同距离位点的土壤含水量显著高于沿株向距树干等距离位点的含水量($P$<0.05)。秸秆覆盖、起垄覆膜垄沟集雨和有机肥覆盖措施相较于空白对照(不覆盖、不灌溉)均能有效改善土壤水分环境, 缓解果树生育期内水分供需矛盾, 其中起垄覆膜垄沟集雨措施的保墒效果最佳, 建议陕北黄土丘陵区山地雨养苹果园采用起垄覆膜垄沟集雨的保墒措施。

**关键词:** 苹果园; 土壤水分; 覆盖; 保墒; 黄土丘陵区
**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)05-0749-10

# Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province*

LI Jiayang[1,2], WANG Yanping[1,2**], HAN Mingyu[3], ZHANG Linsen[3], HAN Wenshe[1,2]

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Knowledge on the variation in soil moisture is critical for the scientific management of orchards, the efficient utilization of limited rainfall and the improvement of fruit production and fruit quality. In this study, a comprehensive soil moisture monitoring method was used in combination with FDR, neutron moisture meter and oven-drying to determine the general

* 国家自然科学基金项目(41571218)、陕西省科技统筹创新工程计划项目(2014KTCL02-06)和陕西省果业专项(榆林山地苹果试验站建设)资助
** 通讯作者: 王延平, 主要从事土壤水分与植物生长方面的研究。E-mail: ylwangyp@163.com
李佳旸, 主要从事土壤水分与植物生长方面的研究。E-mail: jiayang_li@126.com
收稿日期: 2016-8-25 接受日期: 2016-12-27

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41571218), Shaanxi Science & Technology Co-ordination & Innovation Project (2014KTCL02-06) and the Special Fruit Industry in Shaanxi (Construction of Hilly Apple Test Station in Yulin).
** Corresponding author, E-mail: ylwangyp@163.com
Received Aug. 25, 2016; accepted Dec. 27, 2016

characteristics of soil moisture in loess hilly apple orchards of northern Shaanxi Province. Also the variation in soil moisture at different sampling sites around orchard trees and the environmental effects of different dry-farming measures (e.g., straw mulching, ridge film mulching with furrow rainwater harvesting and organic fertilizer mulching) were investigated in 6-year-old 'Fuji' apple orchard for the period from April 2015 to June 2016 in Mizhi County in Shaanxi Province. The results showed that seasonal drought was quite severe, especially during the shoot growth and young fruit development stages. The degree of soil drought in spring was highly dependent on soil water storage in the last winter. Soil moisture in the 0–60 cm soil layer (root-zone layer) varied with rainfall and had seasonal variation characteristics, but lagged behind that of rainfall. The effect of rainfall on the variation of soil moisture weakened with increasing soil depth. Soil moisture in soil layer below 200 cm was relatively stable, but soil desiccation occurred in 6-year-old apple orchard in the hilly region. There was an obvious low humidity layer in the 90–300 cm soil, where volumetric soil water content was less than 12% for the whole year. Soil moisture increased with increased sampling distance from apple tree. While the regression equations of soil moisture between apple plants and between apple tree rows ($y$) with distance to apple tree were respectively $y = 0.010\ 5x + 6.870\ 2$ ($R^2 = 0.996\ 6$) and $y = 0.014x + 7.691\ 2$ ($R^2 = 0.982\ 7$), the mean soil moisture for the sites was closest to the one 105 cm away from the tree Soil moisture at different sites from tree between rows was significantly higher than that at equivalent distance between plants ($P < 0.05$). Compared with CK (no mulching or irrigation), dry-farming measures such as the straw mulching, ridge film mulching and furrow rainwater harvesting and organic fertilizer mulching effectively improved soil moisture environment. To a certain extent, these dry-farming measures were recommended for dealing with the issue of soil water supply and demand, especially during plant growing season. Among the measures, ridge film mulching and furrow rainwater harvesting had the highest degree of preservation of soil moisture. Thus ridge film mulching and furrow rainwater harvesting was recommended as the most effective agricultural measure in preserving soil moisture in rainfed apple orchards in Loess Hilly Areas of northern Shaanxi Province.

**Keywords:** Apple orchard; Soil moisture; Mulching; Soil moisture conservation; Loess Hilly Area



陕北黄土丘陵区是我国黄土高原地区水土流失最为严重的区域。因经济林兼具经济效益和生态效益，众多学者相继开展了黄土高原经济林尤其是果园的土壤水分研究，重点研究了果树耗水深度[1-2]、不同树龄果园土壤水分特征[3-4]以及灌溉条件下的土壤水分研究[5-6]等。在陕西苹果“北扩西进”布局推进下，该区山地苹果发展迅速，面积已达 4 万 $hm^2$，成为颇具影响力的区域特色产业[7]。山地苹果林建设是该区实施退耕还林、深化水土保持和发展现代农林业的成功案例，有效地解决了植被建设成效低、水保效益差和农村经济发展缓慢的长期矛盾[8]。该区降雨量少，且时空分布不均，加之苹果树强烈的蒸腾耗水作用，山地果园土壤水分亏缺严重，严重影响苹果产量和品质[7]。明确土壤水分环境特征是实现果园科学管理、有限雨水资源合理高效利用、保证果树高产优质的关键所在。

许多学者对黄土高原苹果园的土壤水分状况进行了分析研究[7,9-12]，表明陕西省苹果园由南向北土壤水分含量逐渐降低，不同区域、生长年限、立地类型的果园土壤水分特征存在差异。但现有的研究多集中在土壤水分的调控管理、局部区域和不同类型果园的差异，专门针对陕北黄土峁状丘陵沟壑区山地旱作苹果园土壤水分环境的研究尚鲜见报道。本文以陕北米脂山地 6 年生红富士苹果园为研究对象，采用 FDR、中子水分仪和烘干法相结合的土壤水分监测方法，分析研究山地苹果园的土壤水分动态、单株不同位点的水分动态以及不同旱作措施的土壤水分环境效应，以期为强化山地果园的水分管理，提高有限水资源利用率，实现干旱山地苹果园提质增效提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在陕西省果业管理局榆林山地苹果试验站米脂党塔山地苹果科技示范基地进行。当地为典型的黄土峁状丘陵沟壑地貌，海拔 986~1 012 m，干旱和水土流失最为严重，属中温带半干旱性气候。春季气温回升较快、风沙大、雨量少，伴随霜冻和春旱；夏季温暖，有伏旱、暴雨、冰雹和阵性大风出现；秋季温凉，气温下降快，有霜冻；冬季寒冷而干燥。年平均降雨量 451.6 mm，最大年降雨量 704.8 mm，最小年降雨量 186.1 mm。降雨季节性分布不均匀，4—6 月降雨量少，且多为 5 mm 以下的无效降雨，6—9 月则占到降雨量的 60%以上，且多以暴雨形式出现，强度大，每年有相当一部分降雨形成径流流失。年平均气温 8.9 ℃，极端最高气温 38.2 ℃，极端最低气温–25.5 ℃，无霜期 162 d。地形为台地或梯田，土壤为黄绵土，容重 1.20~1.35 $g \cdot cm^{-3}$，田间持

水量为 22.4%, 土壤有机质含量 4.2 g·kg$^{-1}$。果园面积为 13.5 hm$^2$, 苹果树 6 龄, 株行距 4 m×5 m, 主栽品种'红富士', 授粉品种'嘎啦'、'秦冠'等。试验年份 2015 年 4 月—2016 年 6 月的降水量如图 1 所示。

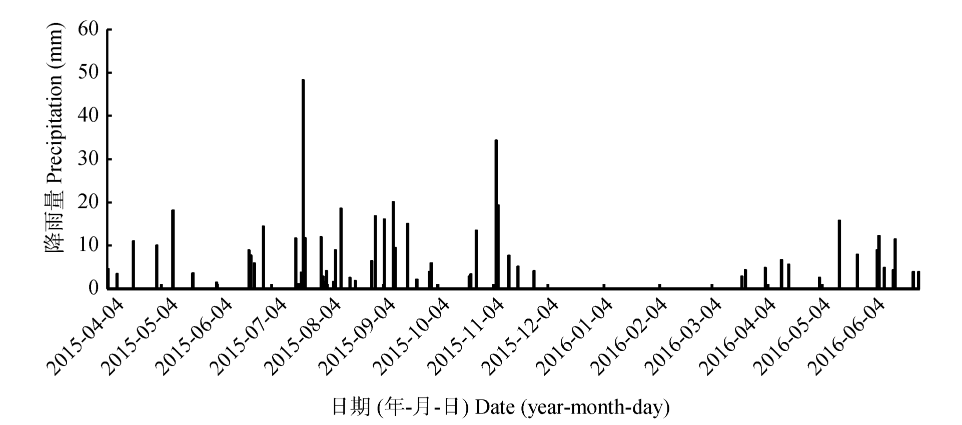



**图 1　2015 年 4 月—2016 年 6 月供试果园的降水量**

Fig. 1　Precipitation of the tested apple orchard from Apr. 2015 to Jun. 2016

### 1.2　研究方法

在试验果园中心地带的 4 棵苹果树对角线连线的中心位置安置 5 个 CS616 土壤水分探针(Campbell Scientific INC.), 测量误差为±3%, 连接 CR1000 型数据采集器(Campbell Scientific, UN), 以每 30 min 的频率对 20 cm、40 cm、60 cm、100 cm、200 cm 土层土壤含水率进行持续监测, 分析山地苹果园土壤干旱状况以及根系集中分布层和根际层的土壤水分动态变化特征。

在试验果园中心及外围地带均匀布置 9 根(呈 3 行 3 列排列)6 m 深中子管, 中子管均位于周围 4 株苹果树对角线连线的中心位置, 每 10~15 d 用 CNC503B(DR)型智能中子水分仪对土壤水分含量进行测定, 0~100 cm 土层每 10 cm 记录一次, 100~580 cm 土层每 20 cm 记录一次。计算不同深度土层土壤含水量的平均值, 研究干旱山地苹果园土壤水分的垂直变化特征。

在试验果园中心地带, 选取长势中等、无病虫害的 3 株苹果树作为样株, 以每个样株的树干为中心, 分别沿株向和行向在距离树干 30 cm、60 cm、90 cm、120 cm、150 cm、180 cm 处埋设 2 m 深中子管, 每 10~15 d 用 CNC503B(DR)型智能中子水分仪对土壤水分含量进行测定, 标定方程为: $y$=59.006$x$+0.270 5。0~100 cm 土层每 10 cm 记录一次, 100~160 cm 土层每 20 cm 记录一次。计算出 3 个样株同一位置土壤水分含量的平均值, 分析山地苹果树单株尺度的土壤水分环境特征。

为了明确不同旱作技术措施对果园土壤水分环境的影响, 采取随机区组设计, 9 株苹果树为 1 小区, 重复 3 次, 3 行 3 列排列, 集中布设目前陕北山地苹果园应用的秸秆覆盖(Ⅰ)、起垄覆膜垄沟集雨(Ⅱ)、有机肥覆盖(Ⅲ)3 种旱作技术措施作为不同处理, 以不覆盖(CK)为对照, 分析各处理下果园土壤水分含量的变化。Ⅰ处理用铡碎的玉米秸秆对整个小区进行覆盖, 厚度为 15 cm 左右; Ⅱ处理以主干为中心, 沿行向在树干两侧各起一条宽 80~100 cm, 中间高 10~15 cm、两边低的弧形垄, 垄上沿行向覆盖厚 0.01 mm、宽 1.6~2 m 的黑色地膜, 膜边修筑深宽各 10 cm 的集雨沟; Ⅲ处理用鸡粪对整个小区进行覆盖, 厚度为 15 cm 左右。每月用土钻取样 105 ℃烘干法测定土壤水分 1 次, Ⅰ、Ⅲ和 CK 均在小区中心的株、行间各打 1 钻取样, Ⅱ处理在垄上、垄沟和行间各打 1 钻。测定深度 2 m, 每 20 cm 取样 1 个。土壤储水量按下式计算:

$$SWS=0.1\times\theta_m\times\rho\times H$$

式中: SWS 为土壤储水量, mm; $\theta_m$ 为质量含水量, %; $\rho$ 为土壤容重, g·cm$^{-3}$; $H$ 为土层深度, cm。

降雨量采用试验果园安置的 Campbell Scientific 生产的农田小气象站监测。

用 Microsoft Excel 2013、SigmaPlot 12.5 进行数据处理和作图, DPS 6.0 进行数据分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　山地果园土壤水分总体状况

#### 2.1.1　山地果园土壤水分的季节动态

陕北山地苹果园土壤水分含量变化与降水、蒸发和果树生理耗水量密切相关。苹果树 80%的根系分布于 0~60 cm 土层[13]。图 2 为试验果园中心位置 4 株苹果树对角线连线中心点 FDR 法测定的土壤水分动态。结果表明, 果树生长季节, 根系集中分布层

(0~60 cm 土层)的土壤水分受降雨影响较大，表现为与降雨较一致的季节变化特征，土壤水分的变化滞后于降雨变化，降雨对土壤水分的影响随土层加深而减弱。冬季，由于土壤结冻，一年中土壤含水量最低。4 月初到 6 月底降雨量少且多为小于 5 mm 的无效降雨，大风频发，日晒强烈，土壤水分蒸发散失量大，加之果树新梢生长和幼果发育对水分的消耗逐渐增大，土壤含水量持续下降。6 月 29 日降雨 14.4 mm, 20 cm 和 40 cm 深土层含水量有所提高，60 cm 土层含水量继续下降。7 月到 9 月为高温多雨的季节，降雨量大且集中，土壤水分含量随降雨量的增加而提高, 7 月 17—22 日连续降雨 77.4 mm, 20 cm、40 cm 和 60 cm 深土层含水量分别提高 43.0%、56.3%和 18.9%; 8 月 28 日到 9 月 10 日累计降雨 68.6 mm, 20 cm、40 cm 和 60 cm 深土层含水量分别提高 48.9%、49.2%和 72.1%，与 7 月 17—22 日相比，降雨量略小，但土壤含水量却提高更多，是由于 7 月的降雨强度大，持续时间短，形成的径流流失量大，雨水下渗相对较少。9 月 22 日至 10 月下旬，尽管气温有所下降，但降雨量少，加之果实发育耗水量较大，各层的含水量均急剧下降。11 月 5—6 日，降雨 53.6 mm，各层的含水量大幅度提升。11 月下旬果树进入休眠季节，至 12 月中旬，由于气温较低，树体对水分的消耗较少，含水量维持在较高水平。进入 12 月下旬，气温降至 0 ℃以下，土壤结冻，土壤中的水分由液态转为固态，液态水含量很低，因此水分探针所能测得的土壤水分急剧下降，冬季土壤含水量一直处于极低水平。翌年 3 月气温回升至 0 ℃以上，土壤开始解冻，土壤中的水分由固态转为液态，虽然只有稀少的降雨，浅层土壤含水量仍急剧升高，至 3 月下旬，冻土层完全化通，土壤含水量达到结冻前水平，因此新一生长季的土壤水分含量高低取决于上一年雨季积累的土壤含水量。

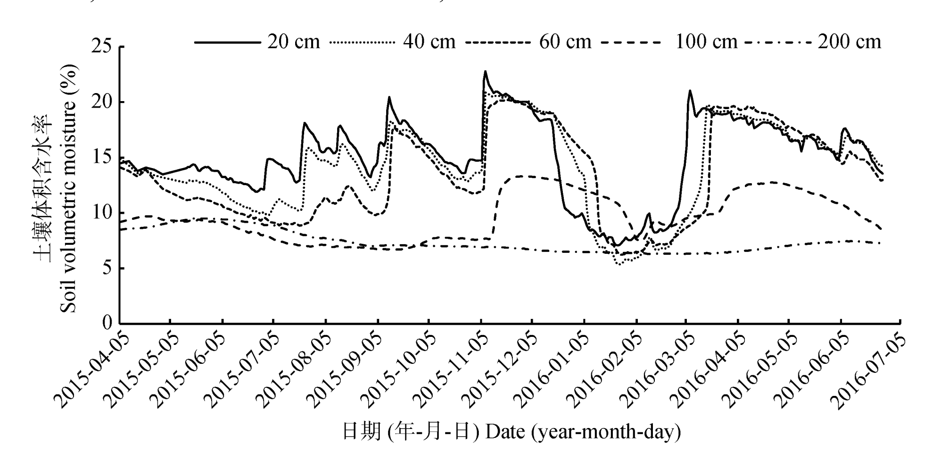



**图 2　果园不同深度土层土壤体积含水率的变化**
Fig. 2　Variations of soil volumetric moistures at different depths in apple orchard

60 cm 以下土层降雨入渗补充量减少，根系的吸收和水分蒸发也都明显减弱，但该层土壤水分含量的高低对苹果树的生长发育仍然至关重要[7]。从图 2 看出, 100 cm 深土层受降雨影响明显减弱，绝大多数降雨不能补充该层水分，在生育期内果树对水分的消耗大于雨水下渗的补给，土壤含水量整体呈下降趋势。11 月 5—6 日的降雨量大且持续，使该土层含水量急剧升高。冬季该土层土壤的结冻期较 0~60 cm 土层短，水分变化也渐弱。200 cm 深土壤含水量较为稳定，试验期间该层土壤水分含量的变异系数仅为 12.7%。这是由于该层土壤水分受外界环境影响更小，根系吸水消耗较少，且黄土高原区地下水埋深较深，只能缓慢向上迁移。

**2.1.2**　山地果园的土壤干旱状况

苹果树生长发育的水分主要靠根系直接从土壤中吸取，因此，采用土壤相对含水量(土壤含水量与田间持水量的百分比)作为衡量山地果园干旱程度的农业干旱指标。一般认为，当土壤相对含水量小于 30%时，为特别重度干旱; 30%~40%时，为重度干旱; 40%~50%时，为中度干旱; 50%~60%时，为轻度干旱；大于 60%时，无旱[14]。

从图 3 可以看出，试验果园存在阶段性干旱严重。2015 年 4 月到 6 月中旬，果园处于中度干旱状态(0~60 cm 土壤储水量为 84.0~100.8 cm)，土壤储水量持续减少。因此，该阶段山地果园应进行适量补水。徐巧等[15]研究表明该时期(萌芽期、开花期、新梢生长和幼果发育期)最适的土壤相对含水量为 50%~60%，建议生产上在苹果萌芽期(3 月下旬—4 月中旬)、开花期(4 月下旬—5 月初)、新稍生长和幼果发育期(5 月下旬—6 月上旬)进行 3 次灌溉补水。

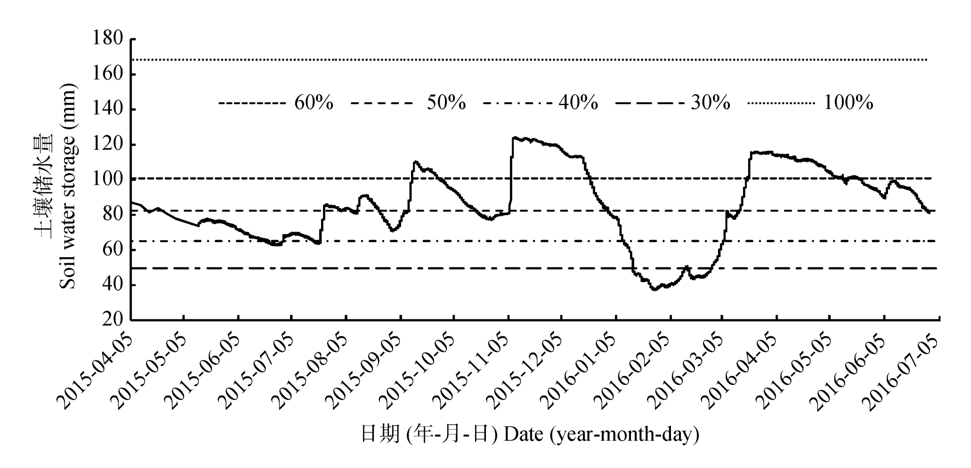



**图 3　果园 0~60 cm 土层土壤储水量的变化**

Fig. 3　Variations of soil water storages in 0–60 cm depth in apple orchard

图中 60%、50%、40%、30%和 100%直线表示土壤相对含水量。Straight lines of 60%, 50%, 40%, 30% and 100% indicate the relative soil moisture contents.



6 月中旬到 7 月中旬，土壤储水量仅有 66.8 mm，果园重度干旱，只有 6 月 29 日和 7 月 17 日两场超过 10 mm 的有效降雨稍稍缓解了重度的干旱，苹果树该时期(新梢生长和幼果发育期)是灌溉补水的关键季节，建议生产上补水 1 次。7 月下旬开始进入高温多雨季节，到 10 月上旬，为苹果的果实膨大期，果园土壤干旱等级基本在轻度干旱，只有 8 月下旬到 9 月上旬中度干旱，苹果树在该阶段最适土壤相对含水量为 70%~80%[15]，故此阶段应补水 1 次。10 月中旬到 11 月初，果园中度干旱，但果实已经采收，可不进行补水。2016 年 3 月下旬到 5 月中旬，土壤含水量较高，无旱象。5 月中旬到 6 月底，由于降水少，果树耗水量增大，出现轻度干旱。

**2.1.3　山地果园土壤水分的垂直变化**

将试验果园布置的 9 根中子管测定的土壤水分数据取平均值，绘制出苹果不同生育期的土壤水分剖面图(图 4)。不难看出，0~580 cm 土层内土壤剖面含水量随深度的增加呈现出明显的“高-低-高”的特征，受降雨、蒸发及果树耗水等综合因素的影响，试验果园土壤含水量的变化主要发生在 200 cm 以上土层，变异程度随土壤深度增加而减弱，土壤含水量的 CV 值达 9.56%~22.71%。200 cm 以下土层含水量保持相对稳定，变异系数 CV 仅为 2.9%~5.3%。这说明自然降水很难下渗补充到 200 cm 以下土层。

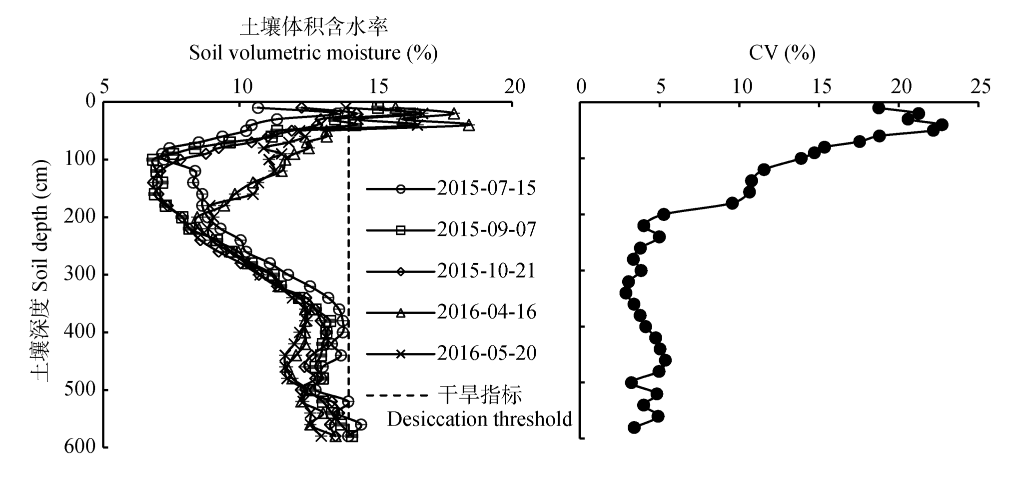



**图 4　不同日期(年-月-日)果园土壤剖面含水量的变化和 CV 值**

Fig. 4　Variations of soil profile moisture and CV values in apple orchard in different dates (year-month-day)

在黄土高原苹果产区，多年生植被因土壤水分长期亏缺而形成的土壤干化普遍存在[7,16-18]，苹果树的生长发育对土壤水分的要求比一般耐旱性植物高，在萌芽、开花、新梢生长和幼果发育期最适土壤相对含水量为 50%~60%，果实膨大期最适土壤相对含水量为 70%~80%[15]，本文以田间持水量的 50%作为果园土壤干化标准[7]。从图 4 不难看出，山地 6 年生苹果园在 60 cm 以下土层已经出现严重土壤干化现象，且在 90~300 cm 存在明显的低湿层，土壤体积含水量常年处在 12%以下，这对苹果园的持续

健康发展非常不利。

## 2.2 山地苹果树单株尺度的土壤水分特征

从图 5 可以看出，苹果树单株尺度范围内，土壤水分存在明显的空间变异性，无论沿行向还是株向，土壤含水量都表现出随着距树干距离的增加而递增的趋势。苹果树吸水根以径向 0~90 cm、垂向 0~120 cm 为主要分布区，且更为集中于 40~60 cm 深度范围内，并以距离树干 60 cm 处的根系分布最广[19]，距离树干越近，根系越发达，吸水越强烈。

对每个水平位置测得的土壤含水量求平均值，与距树干的距离进行拟合，得到土壤含水量($y$)与距树干距离($x$)呈线性正相关关系(表 1)，株间和行间的关系式分别为 $y$=0.010 5$x$+6.870 2 和 $y$=0.014$x$+7.691 2。对单株苹果树株间和行间土壤含水量求平均值，带入拟合关系式，可以反推该平均值所对应的距树干距离，株间为 105.0 cm，行间为 104.6 cm。因此，在研究苹果园土壤水分时，在距离树干 105 cm 左右处取样最佳，最接近于土壤含水量的平均值，最具代表性。

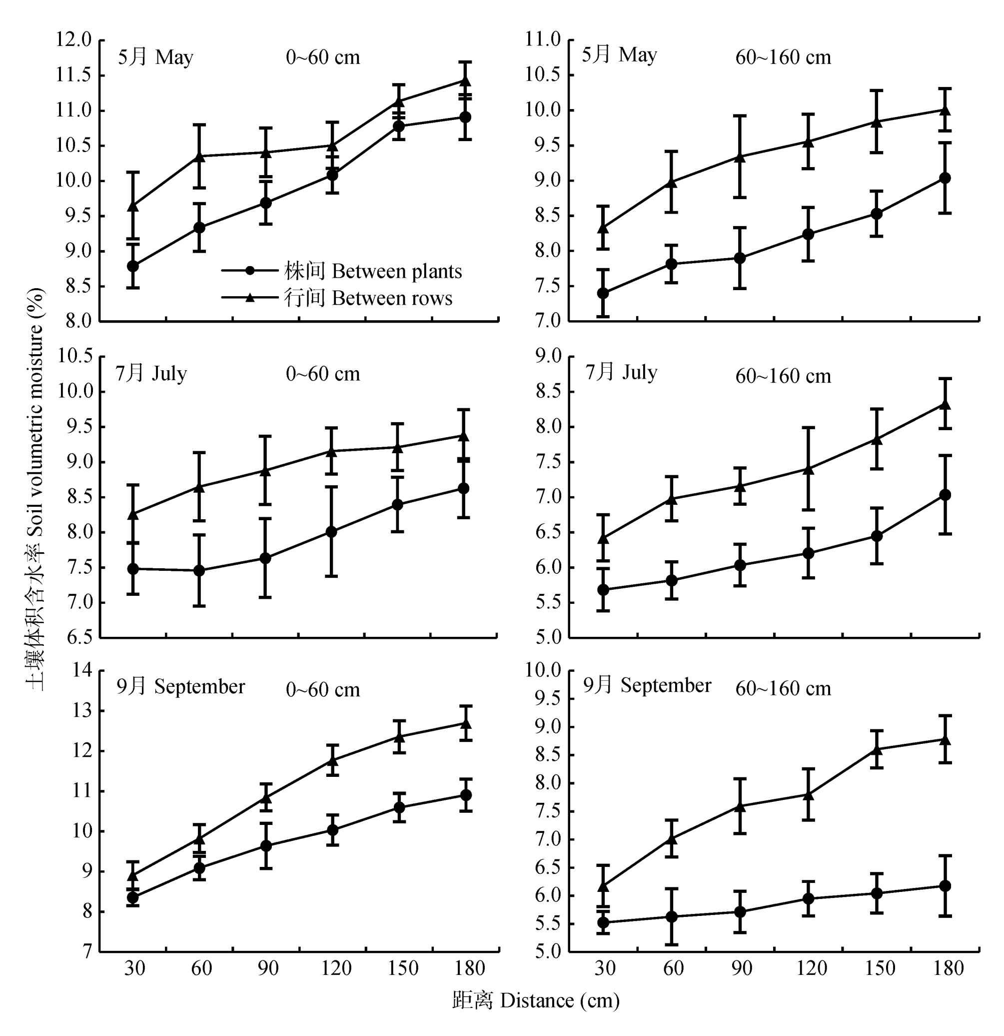



图 5 不同时间距苹果树干不同距离的不同深度土壤含水量

Fig. 5 Soil moistures of different depths at different distances from apple trees in different periods

表 1 土壤含水量($y$)与距苹果树干距离($x$)的拟合关系

Table 1 Fitting relations between soil moisture and distance from tree trunk

| 位置 Location | 公式 Formula | $R^2$ | 土壤含水量平均值 Average soil moisture (%) | 平均值所对应的距树干距离 Corresponding distance from tree trunk to the average soil moisture (cm) |
|---|---|---|---|---|
| 株间 Between plants | $y$=0.010 5$x$+6.870 2 | 0.996 6 | 7.972 7 | 105.00 |
| 行间 Between rows | $y$=0.014$x$+7.691 2 | 0.982 7 | 9.155 9 | 104.62 |

从图 5 还可以看出，沿行向距树干不同距离位点的土壤含水量显著高于沿株向距树干等距离位点的含水量($P$<0.05)。这是由于试验果园株距为 4 m，行距 5 m，相邻两株苹果树株间对土壤水分的竞争

大于行间所致。

### 2.3　不同旱作措施的水分效应

#### 2.3.1　苹果树根系分布集中层(0~60 cm)的土壤水分含量差异

不同覆盖保墒措施对土壤水分保持和散失的影响不同。从图 6 可以看出, 各处理的土壤水分季节变化主要受降雨影响。4—6 月降雨量少, 蒸发强烈, 苹果树耗水量不断增多, 土壤含水量逐渐降低; 7—9 月降雨量增多, 土壤水分得到补充和恢复; 10 月因降雨量有所减少, 土壤水分又有所降低; 因 2015 年 11 月果实采收之后又有较多的降雨, 因此 2016 年 4 月土壤含水量处于较高水平。

0~20 cm 土层含水量受降雨和蒸发影响较大。4—6 月, 各处理的含水量表现为起垄覆膜垄沟集雨(Ⅱ)>有机肥覆盖(Ⅲ)>秸秆覆盖(Ⅰ)>CK, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与 CK 差异显著($P$<0.05), Ⅲ与Ⅰ、Ⅱ差异不显著($P$>0.05), Ⅰ与Ⅱ差异显著($P$<0.05), 由于覆膜对蒸发的抑制效果最好, 起垄覆膜垄沟集雨的保墒效果好于秸秆覆盖和有机肥覆盖; 7—10 月, 各处理的含水量表现为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>CK, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与 CK 差异显著($P$<0.05), Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ彼此之间差异都不显著($P$>0.05), 其原因是雨季降水量大, 能够穿透秸秆和有机肥覆盖层, 有效补充土壤水分, 而起垄覆膜垄沟集雨处理膜下没有雨水入渗, 且行间未覆盖, 土壤水分蒸发量相对较大。20~40 cm 和 40~60 cm 土层受降雨和蒸发的影响相对较小, 各处理的含水量均表现为Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与 CK 差异显著($P$<0.05), Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ彼此之间差异都不显著($P$>0.05), 这是由于覆膜措施行间没有覆盖, 土壤水分蒸发量相对大。春季干旱, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理 0~60 cm 土层的水分含量分别比 CK 提高 14.7%、22.5%和 17.9%; 雨季Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理 0~60 cm 土层的水分含量分别比 CK 提高 16.9%、21.2%和 20.9%。总之, 春季干旱时节, 最大程度地防止土壤水分蒸发, 夏秋高温多雨季节, 强化雨水下渗, 是陕北干旱山地苹果园水分管理的关键。

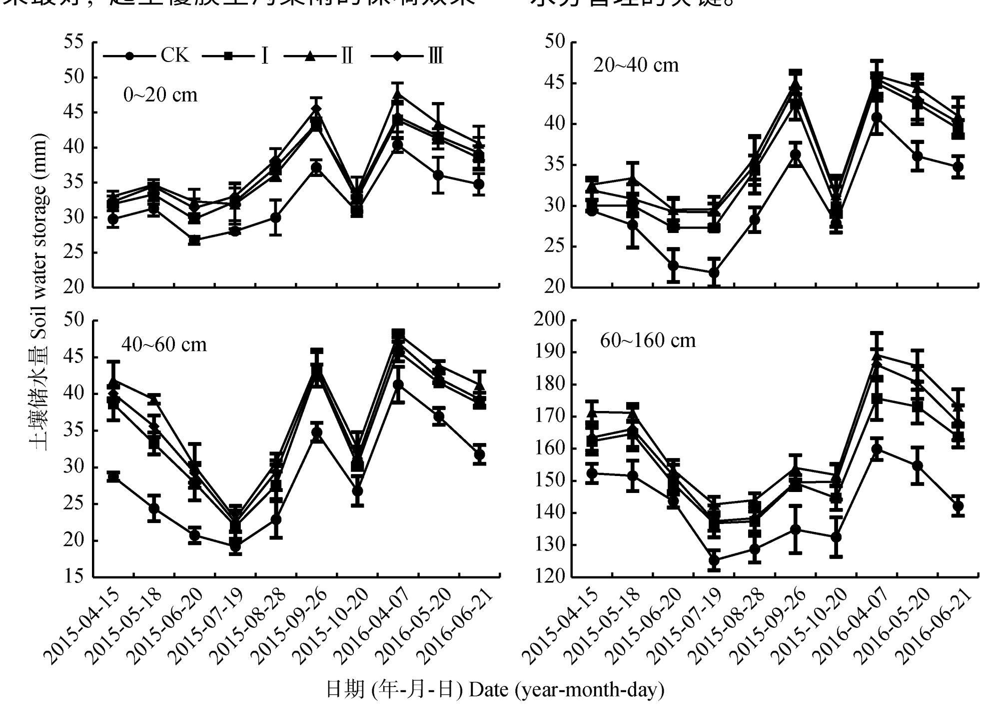



图 6　不同覆盖处理下果园 0~160 cm 土层储水量的变化

Fig. 6　Variations of soil water storages in 0–160 cm layer of apple orchard under different mulching treatments

CK: 对照, 不覆盖不施肥; Ⅰ: 秸秆覆盖; Ⅱ: 起垄覆膜垄沟集雨; Ⅲ: 有机肥覆盖。CK: control, no mulching, no fertilization; Ⅰ: straw mulching; Ⅱ: rainwater harvesting with plastic film cover ridge; Ⅲ: organic fertilizer mulching.

#### 2.3.2　苹果树根际层(60~200 cm)的土壤水分环境

不同覆盖保墒措施对果园 60~200 cm 土层土壤水分含量也有明显影响。从图 6 可以看出, 在生长季内, 各处理的储水量表现为Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与 CK 差异显著($P$<0.05), Ⅲ与Ⅰ、Ⅱ差异不显著($P$>0.05), Ⅰ与Ⅱ差异显著($P$<0.05)。4—6 月降雨量小, 雨水鲜少能够补充到 60 cm 以下土层, 苹果树水分消耗量不断增多, 各处理土壤储水量均呈降低趋势。整个干旱季节Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理土壤储水量比 CK 分别提高 9.3%、15.4%和 12.3%。7 月中旬之后, 降雨量剧增, 60 cm 以下土层水分得到降雨的补给, 土壤储水量得到恢复和上升, 但由于果实发

育消耗大量水分，回升较为缓慢。10 月降雨量减少，土壤储水量随之降低。整个雨季Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理土壤储水量比 CK 分别提高 8.9%、13.6%和 10.3%。可见，覆盖保墒措施有利于根际区土壤水分的积累，对土壤水分环境的改善意义重大。

**2.3.3** 关键季节土壤剖面含水量差异

图 7 所示，各个时期 0~200 cm 土壤剖面含水量都随土层的加深逐渐降低到稳定，各处理的含水量表现为Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK，且Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理土壤含水量显著高于 CK($P$<0.05)。在水分临界期，试验果园 100 cm 以上土层土壤含水量Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ与 CK 差异显著($P$<0.05)，Ⅲ与Ⅰ、Ⅱ差异不显著($P$>0.05)，Ⅰ与Ⅱ差异显著($P$<0.05)；100 cm 以下土层Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理彼此之间差异都不显著($P$>0.05)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理 0~200 cm 土层平均土壤含水量比 CK 分别提高 16.1%、23.8%和 18.7%。花芽分化期土壤含水量有所下降，是由于降雨量小，果树持续消耗土壤水分，各处理的含水量仍表现为Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK，且Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理彼此之间差异都不显著($P$>0.05)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理 0~200 cm 土层平均土壤含水量比 CK 分别提高 18.4%、23.2%和 20.5%。果实膨大期，果实的发育需要消耗大量水分，该时期降雨量大，0~60 cm 土壤水分得到降雨的补给，但 60 cm 以下土层由于雨水的入渗小于果树的耗水，土壤含水量未见提高，该时期各处理的含水量仍表现为Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ>CK，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理彼此之间差异都不显著($P$>0.05)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理 0~200 cm 土层平均土壤含水量比 CK 分别提高 23.0%、29.8%和 26.8%。

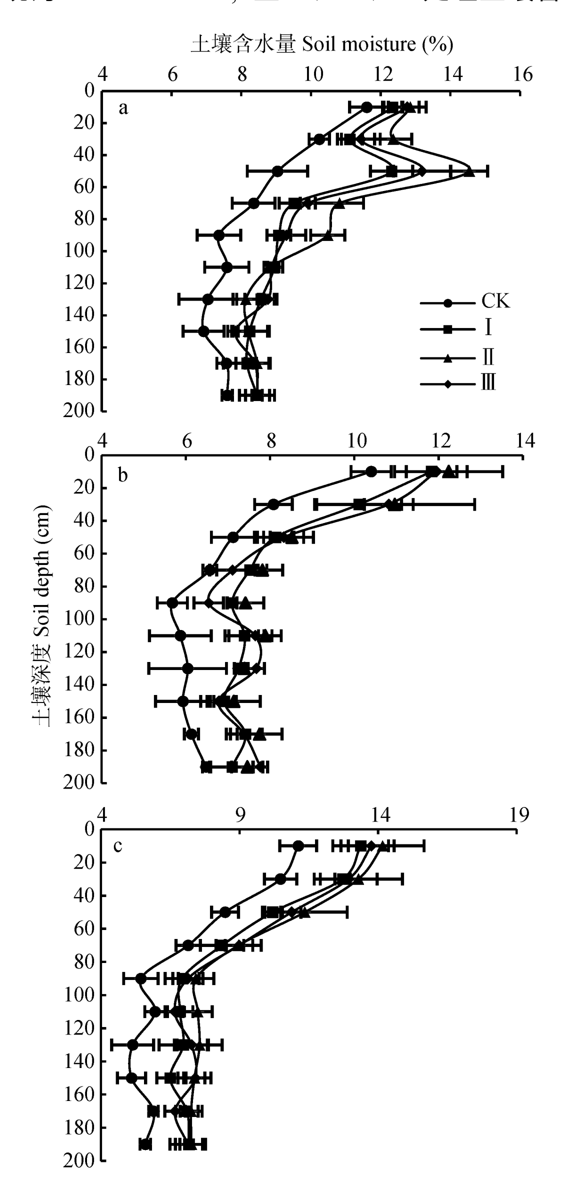



图 7 不同覆盖处理水分临界期(a)、花芽分化期(b)和果实膨大期(c)苹果园土壤剖面含水量

Fig. 7 Soil profile moistures of apple orchard under different mulching treatments at water critical period (a), flower bud differentiation stage (b) and fruit enlargement period (c)

CK：对照，不覆盖不施肥；Ⅰ：秸秆覆盖；Ⅱ：起垄覆膜垄沟集雨；Ⅲ：有机肥覆盖。CK: control, no mulching, no fertilization; Ⅰ: straw mulching; Ⅱ: rainwater harvesting with plastic film cover ridge; Ⅲ: organic fertilizer mulching.

## 3 讨论

土壤水分条件在植物生态系统中起着非常重要的作用[6]。试验果园土壤水分特征表现为 0~60 cm 土层水分随降雨量而变化，表现为较一致的季节变化特征，土壤水分的变化滞后于降雨变化，降雨对土壤水分的影响随土层加深而减弱。100 cm 深土层受降雨影响减弱，只有强度较大的降雨能够下渗到该土层。200 cm 深土层含水量较为稳定，变异系数仅为 5.01%，受外界影响小。这与王延平等[7,9]、邹养军等[12]的研究结果一致，0~60 cm 土层土壤水分消耗较多，雨水的下渗深度可达 1 m 深土层以上[9,20]，但难以达到 2 m，苹果树对下层土壤水分的消耗大于降雨的补充。本试验实现了对果园土壤水分的连续动态监测，甚至包括冬季苹果树休眠季节的土壤水分动态，大气降水是试验果园土壤水分补充的唯一来源，在没有降水的情况下，进入冬季时土壤水分的突然下降和春季气温回暖土壤水分的急剧升高，可能是由于土壤的结冻和解冻，水在固态时不能被水分探针监测所致。黄土高原苹果林地普遍存在土壤干化现象，但大多在成龄果园。本研究发现 6 年生山地苹果园土壤已经出现干化现象，90~300 cm 存在明显的低湿层，土壤体积含水量常年处在 12%以下。这与曹裕等[21]、郭正等[22]研究结果不同，可能是因为试验区域的气候、降雨和土壤质地不同等因素综合影响。研究果园土壤水分环境总体特征，能有效

地指导旱地雨养果园进行合理的水分管理，为实现苹果的提质增效提供理论支持。

苹果树单株尺度范围内，无论行向还是株向，土壤含水量都表现为随着距树干距离的增加表现出单调递增的趋势。这与张义等[23]、李小英等[24]的研究结果一致，由于距树干距离越近，果树的根系越发达且密集，对土壤水分的消耗也越大，土壤水分含量也就越低。土壤含水量与距树干距离呈线性正相关关系，株间和行间的关系式分别为 $y$=0.010 5$x$+6.870 2 和 $y$=0.014$x$+7.691 2，据此得到土壤水分的平均值处在距树干 105 cm 左右位点处。沿行向距树干不同距离位点的土壤含水量显著高于沿株向距树干等距离位点的含水量。因此，适当减小相邻果树对土壤水分的竞争效应，合理的果树栽植密度能够有效地改善果园水分环境，以实现增产增收。

采用地面覆盖措施，可以有效减少土壤水分蒸发，保持水土，增强蓄水保墒能力，提高果园土壤含水量，缓解生长季果树的水分供需矛盾。3 种覆盖方式均能很好地改善旱地果园的土壤水分环境。这与前人[25-29]的研究结果一致。本研究中，起垄覆膜垄沟集雨对山地苹果林土壤水分环境改善的整体效果好于秸秆覆盖和有机肥覆盖。有机肥覆盖起到很好的蓄水、保温、减少土壤蒸发的作用，并且有利于提高土壤的酶活性，增强土壤肥力，但大面积的覆盖会导致环境恶臭；秸秆覆盖起到了截留雨水、蓄水和减缓土壤水分蒸发的作用，并且有利于保持土壤肥力，但苹果产区耕地面积被压缩，生产的秸秆很难满足果园大面积覆盖，且秸秆覆盖易引发病虫害；起垄覆膜垄沟集雨处理株间位置因膜的作用保墒效果佳，而垄沟和行间无覆盖导致土壤水分蒸发强烈，降低了整体的保墒效果，但在春夏干旱季节，很少的降雨即可将雨水积聚到膜边沟内，改善苹果树的局部水分供应状况，局部土壤水分环境的改善对苹果树的生长发育仍能发挥重要作用。因此，建议黄土峁状丘陵沟壑区山地雨养苹果园采用起垄覆膜垄沟集雨的保墒措施。

## 4　结论

1)陕北地区山地苹果园阶段性干旱严重，春季干旱程度取决于上一年入冬前土壤储水量高低。果园 0~60 cm 土层水分随降雨量而变化，表现为较一致的季节变化特征，土壤水分的变化滞后于降雨变化，降雨对土壤水分的影响随土层加深而减弱。100 cm 深土层受降雨影响减弱，200 cm 深土层含水量较为稳定。6 年生山地苹果园土壤已经出现干化现象，90~300 cm 存在明显的低湿层。

2)苹果树单株尺度范围内，无论行向还是株向，土壤含水量都表现为随着距树干距离的增加表现出单调递增的趋势，且沿行向距树干不同距离位点的土壤含水量显著高于沿株向距树干等距离位点的含水量。

3)3 种覆盖方式均能有效改善旱地果园的土壤水分环境。在 0~60 cm 土层，秸秆覆盖、起垄覆膜垄沟集雨和有机肥覆盖措施可分别提高土壤水分含量 14.7%~16.9%、21.2%~22.5%和 17.9%~20.9%；60~200 cm 土层，秸秆覆盖、起垄覆膜垄沟集雨和有机肥覆盖措施可分别提高土壤水分含量 8.9%~9.3%、13.6%~15.4%和 10.3%~12.3%。

## 参考文献 References


[1] 刘晓丽，马理辉，杨荣慧，等. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 139–145
Liu X L, Ma L H, Yang R H, et al. Deep soil water depletion characteristic of jujube plantation in Loess Semiarid Region[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(12): 139–145

[2] 汪星，周玉红，汪有科，等. 黄土高原半干旱区山地密植枣林土壤水分特性研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 263–270
Wang X, Zhou Y H, Wang Y K, et al. Soil water characteristic of a dense jujube plantation in the semi-arid hilly regions of the Loess Plateau in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 263–270

[3] 辛小桂，吴普特，汪有科，等. 山地不同树龄枣园土壤水分状况研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3): 85–89
Xin X G, Wu P T, Wang Y K, et al. Study on soil water condition of mountain jujube yards of different growth years[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 85–89

[4] 李陆生，赵西宁，高晓东，等. 黄土丘陵区不同树龄旱作枣园土壤水分动态[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 145–152
Li L S, Zhao X N, Gao X D, et al. Soil water dynamic of rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) with stand age on Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 145–152

[5] 卫新东，汪星，汪有科，等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88–97
Wei X D, Wang X, Wang Y K, et al. Root distribution and soil water dynamics of jujube plantations in Loess Hilly Regions[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(4): 88–97

[6] 马建鹏，董建国，汪有科，等. 黄土丘陵区枣林地土壤水分时空变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 851–859
Ma J P, Dong J G, Wang Y K, et al. Temporal and spatial variations in soil moisture under jujube forests in the Loess Hilly Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 851–859

[7] 王延平，韩明玉，张林森，等. 陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征[J]. 林业科学, 2013, 49(7): 16–25
Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, et al. Spatial characteristics of soil moisture of apple orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(7): 16–25

[8] 李玉山. 中国著名土壤水分与水土保持学专家李玉山先生论水土保持治理对陆地水循环的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 2
Li Y S. Li Yushan, a famous expert on soil moisture and soil

and water conservation in China, discussed the impact of soil and water conservation to terrestrial water cycle[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 2

[9] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 731–738
Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, et al. Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi Province of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 731–738

[10] 茹豪, 张建军, 张琦, 等. 晋西黄土区雨养果园土壤水分动态及对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 36–42
Ru H, Zhang J J, Zhang Q, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in the rain-fed orchard in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 36–42

[11] 张义, 谢永生, 郝明德. 黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J]. 土壤, 2011, 43(2): 293–298
Zhang Y, Xie Y S, Hao M D. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau[J]. Soils, 2011, 43(2): 293–298

[12] 邹养军, 陈金星, 马锋旺, 等. 渭北旱塬不同种植年限苹果园土壤水分的变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 41–43
Zou Y J, Chen J X, Ma F W, et al. Characteristics of soil moisture change of apple orchards of different planting years in Weibei Dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 41–43

[13] 郝仲勇, 刘洪禄. 苹果树根系分布特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(6): 63–66
Hao Z Y, Liu H L. Experimental investigation on root system distribution of apple tree[J]. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(6): 63–66

[14] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043–1052
Li B Z, Zhou G S. Advance in the study on drought index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043–1052

[15] 徐巧, 王延平, 韩明玉, 等. 水分调控对干旱山地苹果树生长发育和结实的影响[J]. 节水灌溉, 2016, (2): 9–13
Xu Q, Wang Y P, Han M Y, et al. Effect of moisture regulation on growth and development of apple trees at arid hilly region[J]. Water Saving Irrigation, 2016, (2): 9–13

[16] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427–432
Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 427–432

[17] Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2467–2477

[18] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7056–7066
Zhang J J, Li H M, Xu J J. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7056–7066

[19] 郑利剑, 马娟娟, 郭飞, 等. 蓄水坑灌下矮砧苹果园水分监测点位置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 160–166
Zheng L J, Ma J J, Guo F, et al. Monitoring locations of soil water content in water storage pit irrigated dwarfing apple tree orchard[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(10): 160–166

[20] 孟秦倩, 王健, 吴发启, 等. 黄土山地苹果园土壤水分最大利用深度分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 65–71
Meng Q Q, Wang J, Wu F Q, et al. Soil moisture utilization depth of apple orchard in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 65–71

[21] 曹裕, 李军, 张社红, 等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 72–79
Cao Y, Li J, Zhang S H, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones of Loess Plateau in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15): 72–79

[22] 郭正, 李军, 张玉娇, 等. 黄土高原不同降水量区旱作苹果园地水分生产力和土壤干燥化效应模拟与比较[J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 135–150
Guo Z, Li J, Zhang Y J, et al. Simulation and comparison of water productivity and soil desiccation effects of apple orchards in different rainfall regions of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 135–150

[23] 张义, 谢永生, 江青龙. 不同生产力水平苹果园土壤水分空间异质性[J]. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1326–1332
Zhang Y, Xie Y S, Jiang Q L. Spatial heterogeneity of soil moisture in apple orchards with different productivity level[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1326–1332

[24] 李小英, 段争虎, 陈小红, 等. 黄土高原西部人工灌木林土壤水分分布规律[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 38–43
Li X Y, Duan Z H, Chen X H, et al. Distribution of soil moisture under different planted shrubs on the west Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 38–43

[25] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 等. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080–2087
Gao M S, Liao Y C, Li X, et al. Effects of different mulching patterns on soil water-holding capacity of non-irrigated apple orchard in the Weibei Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(10): 2080–2087

[26] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 等. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2652–2658
Huang J H, Liao Y C, Gao M S, et al. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(11): 2652–2658

[27] 尼群周, 石海强, 秦立者, 等. 苹果园地表覆盖方式对土壤含水量及果实品质的影响[J]. 河北农业科学, 2010, 14(10): 18–21
Ni Q Z, Shi H Q, Qin L Z, et al. Effects of surface mulching patterns on the soil water content and fruit quality in apple orchard[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(10): 18–21

[28] 张义, 谢永生. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 85–92
Zhang Y, Xie Y S. Effects of different patterns of surface mulching on soil hydrology in an apple orchard[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 85–92

[29] 苏一鸣, 王延平, 毛晨鹏, 等. 集雨保墒措施对旱地苹果园土壤水分、温度及叶片生理的影响研究[J]. 节水灌溉, 2013, (6): 22–28
Su Y M, Wang Y P, Mao C P, et al. Effects of different rain-water-collection and soil moisture conserving ways on soil moisture, temperature and leaf physiological characteristics in arid apple orchard[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (6): 22–28